

А. Е. Иванов^{*}, В. А. Пожого, О. Н. Гвоздева

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
г. Москва

^{*}*alexey_24@list.ru*

Научный руководитель – проф., д-р техн. наук *С. В. Скворцова*

ВЛИЯНИЕ БИМОДАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА Ti–14Al–3Nb–3V–0,5Zr

В работе определены кратковременные механические свойства сплава Ti–14Al–3Nb–3V–0,5Zr при температурах 20° и 700 °С. Показано, что использование обратимого легирования водородом позволяет создать в жаропрочном сплаве, содержащем малую объемную долю β -фазы, бимодальные структуры с различными соотношением объёмных долей и размерами структурных составляющих α_2 -фазы, обладающие повышенным комплексом механических свойств.

Ключевые слова: жаропрочный титановый сплав, интерметаллид, алюминид, термоводородная обработка, вакуумный отжиг.

V. A. Pozhoga, A. E. Ivanov, O. N. Gvozdeva

INFLUENCE OF BIMODAL STRUCTURE ON MECHANICAL PROPERTIES OF Ti–14Al–3Nb–3V–0.5Zr ALLOY

In this work short-term mechanical properties of Ti–14Al–3Nb–3V–0.5Zr alloy are determined at the temperatures of 20° and 700°C. It is shown that reversible hydrogen alloying allows obtaining in the heat-resistance alloy with low volume fraction of β -phase bimodal structures with different volume fractions ratio and sizes of α_2 -phase structural constituents and advanced mechanical properties complex.

Keywords: heat-resistant titanium alloy, intermetallic, aluminide, thermohydrogen processing, vacuum annealing.

Данное исследование является продолжением работ, результаты которых были ранее опубликованы [1, 2]. Данные работы показывают, что формирование структуры при вакуумном отжиге в первую очередь определяется его температурой. Наиболее эффективный вакуумный отжиг, для титановых сплавов, проводится при температурах порядка 800–900 °С [3]. Проведенный вакуумный отжиг при таких температурах в исследуемом сплаве выявил, что процесс роста первичной α_2 -фазы преобладает над процессами её зарождения и в результате формируется структура содержащая глобулярные частицы первичной α_2 -фазы (объемная доля β -

фазы составляет менее 10 %) (рис. 1, а). А процесс формирования бимодальной структуры, в исследуемом сплаве, проходит при условии, когда процессы зарождения вторичной α_2 -фазы будут преобладать над процессами роста первичной. Поэтому, для получения бимодальной структуры в опытном жаропрочном сплаве Ti-14Al-3Nb-3V-0,5Zr был проведен двухступенчатый вакуумный отжиг. При температуре вакуумного отжига 850 °С в опытных образцах формируется структура с объемной долей первичной глобулярной α_2 -фазы около 50 %, мелкодисперсной вторичной α_2 -фазой и β -фазой (в прослойках), составляющих 40 % и 10 %, соответственно (рис. 1, б). При температуре 950 °С заметно укрупнение структурных составляющих первичной α_2 -фазы (рис. 1, в). Объемная доля α_2 -фазы составляет около 70 %.

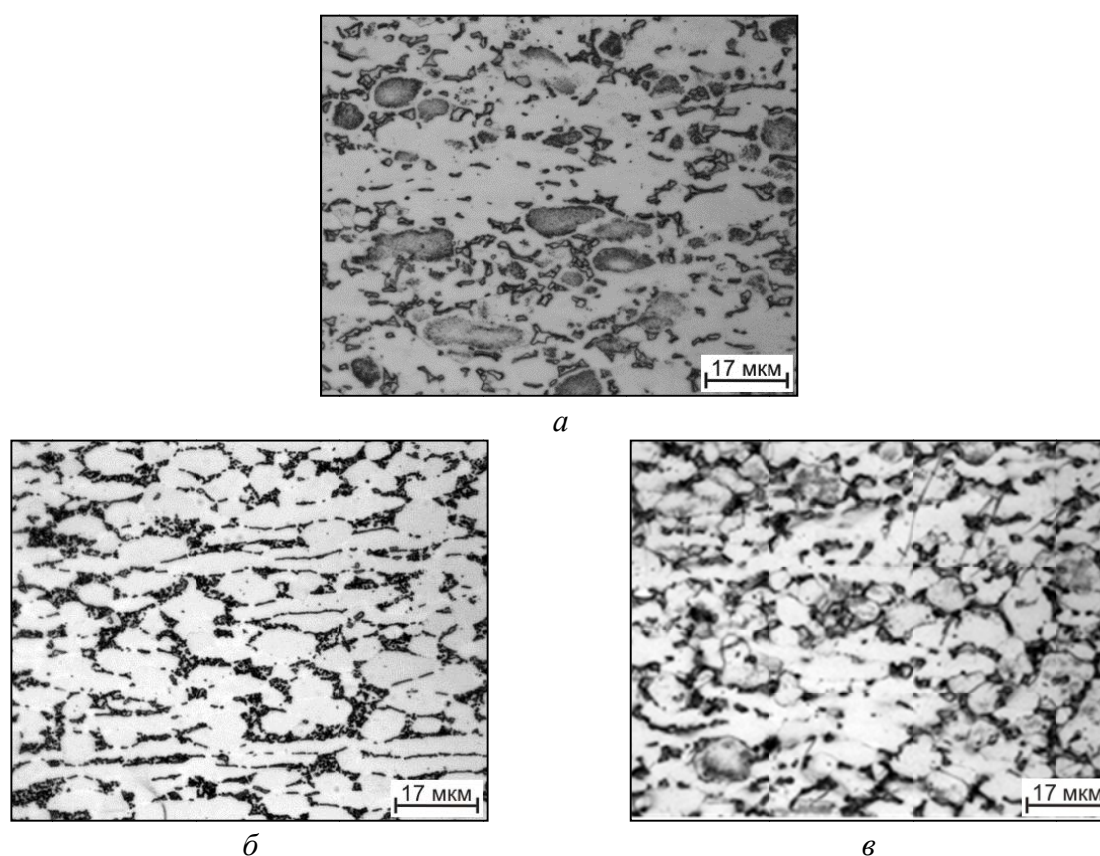


Рис. 1. Микроструктуры из опытного сплава Ti-14Al-3Nb-3V-0,5Zr после одноступенчатого вакуумного отжига при температуре 950 °С (а) и двухступенчатого вакуумного отжига при температуре 550 и 850 °С (б) и 950 °С (в)

В данной работе были проведены исследования на влияние параметров полученных структур на механические свойства опытного сплава при нормальной и повышенной температурах. Под механические испытания на растяжение были подготовлены стандартные образцы с толщиной рабочей части 2 мм. В ходе испытаний записывали первичные диаграммы растяжения в координатах «нагрузка–удлинение».

Прочностные характеристики определяли по диаграммам, пластические – по испытанным образцам и диаграммам, используя стандартные методики.

Проведенные испытания, при нормальной температуре, на растяжение и ударную вязкость представлены в табл. 1. У образцов с бимодальной структурой наблюдается более высокие прочностные характеристики, чем у образцов с равноосной структурой. Наилучший результат предела прочности и текучести показывает сплав с бимодальной структурой, содержащий около 70 % первичной α_2 -фазы.

Таблица 1

Механические испытания опытного сплава с различной структурой при нормальной температуре

Режим предварительной обработки	Температура вакуумного отжига, °C	Тип структуры, количество первичной α_2 -фазы, %	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCU МДж/м ²
НО при 850 °C до 0,44 %, прокатка при 800 °C	550 + 850	Бимодальная, 50	1170	1020	1,7	2,2	0,08
	550 + 950	Бимодальная, 70	1190	1060	2,1	3,9	0,11
	850	Равноосная α_2 , 90	1110	980	3,6	4,8	0,16

При уменьшении количества и размера первичной α_2 -фазы прочностные характеристики снижаются, так же опытный сплав с бимодальной структурой содержащий около 50 % первичной α_2 -фазы имеет минимальную пластичность, при чем наблюдалось разрушение образцов при проводимом испытании. Данное поведение образцов можно объяснить, тем, что пластическая деформация, протекающая при нормальной температуре, практически подавляет дислокационные механизмы, проходящие в дисперсной ($\alpha_2+\beta$)-структуре.

С другой стороны, когда структура сплава представлена преимущественно первичной α_2 -фазой, прочность и пластичность сплава зависят только от сопротивления пластической деформации этой структурной составляющей. При этом достигаются максимальные значения относительных удлинения и сужения при нормальной температуре – соответственно 3,6 и 4,8 %.

Наилучшие прочностные и пластические характеристики достигаются в опытном сплаве с бимодальной структурой, содержащей около 70 % первичной α_2 -фазы. По-видимому, именно такая структура, включающая в себя, помимо первичной α_2 -фазы, частицы вторичной α_2 -фазы и β -прослой, осуществляет появление дислокационных механизмов.

Полученные в ходе работы результаты ударной вязкости имеют те же тенденции и хорошо связаны с характеристиками пластичности при растяжении. При этом абсолютные величины ударной вязкости в сплаве очень малы, что подтверждает высокую чувствительность сплава к концентрации напряжений при динамическом нагружении (см. табл. 1).

Механические свойства опытного сплава при температуре 700 °С, также изучали на образцах со сформированной бимодальной структурой, содержащей около 50 и 70 % первичной α_2 -фазы, а так же структурой, которая имеет около 90 % равноосной первичной α_2 -фазы. Результаты данных испытаний представлены в табл. 2.

Таблица 2

Механические свойства опытного сплава при температуре 700°С

Режим предварительной обработки	Температура вакуумного отжига, °С	Тип структуры, количество первичной α_2 -фазы, %	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
НО при 850 °С до 0,44 %, прокатка при 800 °С	550 + 850	Бимодальная, 50	780	710	36,0	44,0
	550 + 950	Бимодальная, 70	730	630	38,2	46,7
	850	Равноосная α_2 , 90	800	620	39,0	48,2

Анализ этих результатов показывает, что при всех полученных в результате термоводородной обработки структурных состояниях достигаются достаточно высокие показатели как прочности, так и пластичности. Наилучшее сочетание прочностных и пластических характеристик имеет сплав с бимодальной структурой, представленной 50 % первичной α_2 -фазы и смесью вторичной α_2 - и β -фаз.

Таким образом, исследования показали, что использование обратимого легирования водородом позволяет создать в жаропрочном сплаве, содержащем малую объемную долю β -фазы, бимодальные структуры с различным соотношением объёмных долей и размеров структурных составляющих α_2 -фазы, обладающих повышенным комплексом механических свойств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гвоздева О. Н. Влияние температуры нагрева на формирование фазового состава и структуру опытного жаропрочного титанового сплава на основе Ti_3Al , легированного водородом / О. Н. Гвоздева, В. А. Пожого, А. А. Орлов // Уральская школа молодых металлосведов: сборник материалов и докладов XVII Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлосведов – молодых ученых (Екатеринбург, 7–11 декабря 2015 г.). В 2 ч. Ч. 2. Екатеринбург : УрФУ, 2015. С. 97–99.
2. Пожого В. А., Формирование бимодальной структуры в опытном жаропрочном сплаве на основе алюминида титана / В. А. Пожого, О. З. Умарова, А. Е. Иванов // Уральская школа молодых металлосведов: сборник материалов. XVII Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлосведов – молодых ученых (Екатеринбург, 5–9 декабря 2016 г.). В 2 ч. Ч. 1. Екатеринбург : УрФУ, 2016. С. 161–165.
3. Водородная технология титановых сплавов / А. А. Ильин [и др.]. Москва : МИСИС. 2002. 392 с.